[文章编号]1002-8528(2008)10-0095-05

再生水生命周期综合价值模型与计算

熊家晴 ,华莉芳 ,王 巧 ,王晓昌
(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室 ,西安 710055)

[摘　要] 传统的再生水评价往往集中在污水再生利用工程对生态环境的影响、经济效益和社会效益的定性评价等方面。本文首先提出了适用于城市再生水评价的生命周期综合价值模型 ,该模型能有效量化城市再生水的成本、效益以及对环境的影响。而后结合具体的再生水项目分别对再生水生命周期性能指数、成本指数、环境影响指数以及综合价值指数进行了分析计算 ,其结果能直观表达再生水生命周期价值 ,可为决策者提供宏观决策依据。

[关键词] 污水处理 ;再生水 ;生命周期评价 ;综合价值模型
[中图分类号] TV213. 9　　[文献标识码] A

Life Cycle Integrated Value Model and Application of Reused Wastewater Product

XIONG Jia-qing , HUA Li-fang , WANG Qiao , WANG Xiao-chang
(*School of Environmental and Municipal Engineering , Xi'an University of Architecture and Technology , Key Laboratory of Northwest Water Resource , Environment and Ecology of Ministry of Education , Xi'an* 710055 , *China*)

[**Abstract**] Traditional reused water assessment usually focuses on the qualitative assessment of ecological environment impact ,economic benefit and social benefit of wastewater reuse project. In this paper ,one life cycle integrated value model applied to municipal reused water assessment was firstly proposed. The model could effectively quantize the cost and benefit of reused wastewater and the impact to environment. Secondly ,in consideration of reused wastewater project ,the parameters ,such as performance index ,cost index ,environment impact index and integrated value index ,were analyzed and calculated ,the results of which showed life cycle value of reused wastewater directly. As a result , macroscopical basis for decision-maker was offered.

[**Keywords**] wastewater treatment ,reused wastewater product ,life cycle assessment ,integrated value model

0 前　言

生命周期评价(LCA)是对产品或过程从最初的原材料采集到加工制造、产品使用以及用后处理的全过程进行跟踪和定量分析(即所谓的从摇篮到坟墓)与定性评价的方法[1-2]。生命周期评价在国外应用和发展了近 30 年 ,已成为许多政府和企业的环境管理工具[3]。但是 ,国内外关于污水处理回用方面的生命周期研究成果并不多 ,国外的研究主要有[4-7] :初步建立城市污水系统规划生命周期评价框架 ;污水系统生命周期系统边界的影响与计算环境负荷的范围分析 ;运用 LCA 对污水处理厂进行全过程环境影响评价、处理工艺比较案例研究以及对污水处理工程进行生命周期经济评价等。我国除了杨健等学者仅对废水处理技术生命周期分析基本概念进行了初步探索并对 AB 活性污泥法和普通生物滤池处理工艺进行了生命周期能耗分析以外 ,还没有研究者用 LCA 对再生水进行全面的量化评估[8-9]。本文依据现有 LCA 的原则和技术框架的要求 ,建立适用于城市再生水评价的生命周期综合价值模型 ,并结合具体的工程实例进行检验。

1 综合价值模型的建立

1.1 构建综合价值模型的 3 要素

再生水生命周期评价必须以再生水产品为中心 ,它主要由 3 个要素组成 :性能(Performance) 、成本(Cost) 和环境影响(Impact) 。其中 ,成本(C) 包括原料获取成本、制造(处理) 成本、收集与输送成本等生命周期全过程成本 ;性能(P) 包括处理的难易程度、出水水质、使用对象的位置以及对水质的要求等 ;环境影响(I) 包括地球温室效应、臭氧层破坏、资源耗

[收稿日期] 2008-04-07　　[修回日期] 2008-05-15
[基金项目] 国家自然科学基金国际合作重点项目(50138020)
[作者简介] 熊家晴(1969-) ,男 ,博士 ,副教授
[联系方式] xiongzqren @163. com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

竭、生物毒性、土地利用以及酸雨等。

1.2 再生水综合价值模型

再生水综合价值的数学模型可表示为:

$$V = P/(IC) \tag{1}$$

式中,V 为再生水综合价值指数;P 为再生水的性能指数;I 为再生水生命周期环境影响指数;C 为再生水产品成本指数。

由式(1)可知,再生水产品的综合价值随着产品性能的提高而提高,随着产品的成本以及对环境影响的增大而减小,这就要求在再生水生产过程中必须提高再生水的水质,选择更容易处理的原水以及选择适当的回用对象与方式;同时,在整个生产过程中,要求对环境的影响最小、成本最低,即在整个生命周期过程中要尽量采用对环境影响小且运行可靠的工艺;减少所用原材料或采用成本更低的原材料和处理工艺或者降低收集与输送成本。

2 再生水生命周期性能指数的确定

在污水再生回用过程中,将污水处理过程看作产品的生产过程,即把原水作为原材料、出水作为产品,污泥以及沼气等作为产品生产过程中的副产品,考虑再生水生产的特殊性,需要把上游产品——污水处理回用工程纳入其中[9]。再生水性能包括处理的难易程度、使用的安全性、出水水质、使用对象的位置以及对水质的要求等。在对性能指数进行量化时,需要采用层次分析、模糊数学等相关方法。为了简化问题,本文通过选取水质指标作为特征参数,采用目标距离方法对再生水的性能进行量化,目的是为了寻求一个共同标准。

距离到目标(Distance to Target)方法是用某种环境效应的当前水平与目标水平(标准或容量)之间的距离来表征某种环境效应的重要性,这一方法在德国、挪威、英国和荷兰均有应用[10]。

水质性能指数可借鉴上述方法建立如下评估模型:

$$P = \sum_{i=1}^{n} f_i \frac{B_i}{A_i} \tag{2}$$

式中:P 为水质性能指数($0 < P < 1$),P 值越小性能越好;B_i/A_i 为当前水质与目标水质的相对距离,B_i 为当前水质,A_i 为目标水质;f_i 为水质指标权重因子,可采用模糊层次分析方法确定,为了方便计算,本文采用等权重因子。

本文以西安市北石桥污水净化中心再生水厂为例进行计算,从表1的计算结果可以看出,该再生水厂的再生水出水水质与目标水质的相对距离小于5.351,则生命周期性能指数小于0.382(由5.351/14得到)。

表1 目标距离法比较北石桥再生水厂出水水质

序号	项目	杂用水水质标准(城市绿化洗车,扫除)	出水水质	相对距离
1	浊度/度	5	0.32	0.064
2	溶解性固体/(mg/L)	1 000	528	0.528
3	悬浮性固体/(mg/L)	5	15	1
4	色度/度	30	<1.0	<0.033
5	pH值	6.5～9.0	7.47	0.388
6	BOD_5/(mg/L)	10	11.14	1
7	COD_{Cr}/(mg/L)	50	13.67	0.273
8	氨氮(以N计)/(mg/L)	10	1.11	0.111
9	总硬度(以$CaCO_3$计)/(mg/L)	450	193	0.429
10	氯化物/(mg/L)	300	83.3	0.278
11	阴离子合成洗涤剂/(mg/L)	0.5	0.14	0.28
12	铁/(mg/L)	0.4	<0.10	<0.250
13	锰/(mg/L)	0.1	<0.05	<0.500
14	总大肠菌群/(个/L)	3	38	1
	总计	<5.351		

注:水质不达标时,相对距离取1。

3 成本指数分析

3.1 生命周期成本

产品生命周期成本概念最早是由美国国防部提出的,美国国家标准和技术研究院(NIST)将其定义为拥有、运行、维护修理和处置某一项目或项目系统所发生的成本在一段时期内的贴现值的总和[11]。

再生水产品生命周期成本是指在考虑货币时间价值的前提下,从再生水工程项目可行性研究开始,到勘察设计、运营以及维护直到废除的整个生命周期所花费用的总和,一般包括建设成本和使用成本。建设成本包括建造成本、工程建设费用、其它变动建设成本等[12-13];使用成本包括运行费用、维修养护和改造费用、管理费用、不利因素增加导致的附加费用。对于污水处理再生利用工程来说,工程全生命周期方案的选择需要运用价值工程使其在满足必要功能的前提下,实现全生命周期成本最低。

一般的生命周期成本是把每种成本的现值加起

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

来,并且减去例如转售价值等的现金流入的现值。

3.2　成本指数 —生命周期成本无量纲化

在明确了成本范畴的分解和成本内容后,需建立再生水的全生命周期成本指数模型。如下式:

$$C_I = NPV / NPV_0 \tag{3}$$

式中,C_I 为成本指数;NPV 为待评污水处理回用工程的再生水成本;NPV_0 为地区性再生水计算成本。当 C_I 大于 1 时表明该项目成本较高,小于 1 时成本较低。

为了确定成本指数,首先要确定地区性计算成本,地区性计算成本涉及影响因素很多,可参照国家污水项目建设标准计算,如假定某地区某一规模污水回用项目 NPV = 1 500元/m^3,当计算所得的当地同一规模的 NPV_0 为1 000元/m^3 时,C_I = 1 500/1 000 = 1.5。如北石桥污水净化中心一期工程包括规模为 5 万 m^3/d 的深度处理厂和 10.6 km 的配套管道,建设投资6 980万元,其中处理厂投资5 320万元,管网投资1 460万元。北石桥的再生水单位投资成本 NPV 为1 396元/m^3,再根据《全国市政工程概预算评价手册》计算出西安地区同等规模的再生水计算成本 NPV_0 为1 824元/m^3,即可得到无量纲化的成本指数 C_I = 1 396/1 824 = 0.77。

4　生命周期环境影响指数的求定

4.1　生命周期分析

在 LCA 研究中,需要重点考虑环境影响问题,即确定环境负荷的大小和影响程度,根据所定义的目标和界定的范围,综合考虑各方面影响因素。在清单分析阶段,需要收集各段的清单数据,主要包括各单元过程 ——污水收集阶段、污水处理阶段、污水回用或排放及污泥处理和处置阶段的清单数据,如相关建筑材料、材料生产及工艺运行能耗、材料生产及运行过程中的污染物排放量等基本数据。

当得到再生水生命周期全过程客观量化的环境影响数值后,可用一个指标来表征被评价过程的环境负荷。目前,环境影响评估的方法仍在不断研究中,新的指标不断出现,其基本步骤都可分为 3 步:分类、特征化和量化[14]。

1) 考虑到环境问题的复杂性和影响种类的多样性,将再生水生产整个过程所产生的环境影响简化分为:大气酸化、全球变暖、水体富营养化和水生物毒性 4 类,以便进行量化计算,见表 2。

表 2　再生水生命周期环境影响分类及主要污染物

环境影响分类	相关污染物	来源
全球变暖	CO_2, NO_X CH_4 CO	生物处理设备、污泥处置 消化过程、污泥处置 材料与污泥运输
大气酸化	NH_3, NO_2, SO_2	格栅间、沉砂池、初沉池、生物处理设备、消化池
水体富营养化	N, P	回用水、排放水
水生物毒性	重金属(Hg、Cd、Cu 等)	回用水、排放水

注:再生水生命周期环境影响包括各单元过程的原材料生产、运输、施工建设、运行以及设施拆除等阶段。

2) 将与各环境损害项相联系的目录项进行汇总,定量计算造成各种环境损害的大小,对影响项目进行特征化,每一类环境类别影响的指标 EB 可从下式计算[2]:

$$EB = \sum_{i=1}^{n} W_i PF_i \tag{4}$$

式中,i 为排放物中所含的各种化学物质种类;n 为排放物中各化学物质的总数;W_i 为第 i 种物质的重量;PF_i 为第 i 种物质对某类环境所造成影响的潜能因子(Potential Factor)。

城市污水再生利用所涉及的各种环境影响类别的 PF 可参见表 4[2]。根据各物质的潜能因子 PF 及其排放量便可确定每种污染类型的环境影响负荷。

3) 确定各种环境损害的权重,与前面得到的各种环境损害大小加权求和进行量化,从而得出一个指标来表示对评价过程造成的环境负荷。量化方法包括线性规划法和层次分析法等[15]。

4.2　生命周期环境影响指数的求定

生命周期环境影响指数 I_a 可用式(5)所示的数学模型表示:

$$I_a = \sum_{i=1}^{n} k_i a_i \tag{5}$$

式中,n 为生命周期环境影响种类总数;k_i 为第 i 类环境影响的权重;a_i 为第 i 类环境影响特征化标准值。

根据资料和文献[3]和[16],结合城市污水处理工艺的特点,本文拟采用层次分析法(AHP)对再生水生命周期环境影响进行量化,具体步骤如下:

1) 构造判断矩阵。为了将比较判断定量化,层次分析法引入 1～9 比率标度法[15],并写成矩阵形

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式,构成判断矩阵(见表3)。

表3 判断矩阵的构建

影响项目	全球变暖	大气酸化	水体富营养化	水生物毒性
全球变暖	1	2	3	4
大气酸化	1/2	1	2	3
水体富营养化	1/3	1/2	1	2
水生物毒性	1/4	1/3	1/2	1

(2)一致性检验。为考虑层次分析得到的结果是否基本合理,需要对判断矩阵进行一致性检验,经过检验后得到的结果才可认为是可行的。

计算可得该矩阵的特征向量为 $W = [0.466, 0.277, 0.161, 0.096]^T$,矩阵最大特征值 $\lambda_{max} = 4.031$。$EI = (\lambda_{max} - N)/(N - 1) = 0.01$, $RI = 0.90$, $ER = EI/RI = 0.01/0.90 < 0.10$,说明上述评判矩阵具有满意的一致性。其中,$EI$ 是引入判断矩阵最大特征根以外的其余特征根的负平均值,它是作为度量判断矩阵偏离一致性的指标,用来检查决策者判断思维的一致性;RI 是引入判断矩阵的平稳随机一致性指标,用来衡量不同的判断矩阵是否具有满意的一致性;ER 是随机一致性比率。

3)根据上述计算所得的数据及环境问题进行分类,利用环境负荷指标方法将相同影响类型下的不同影响因子进行汇总,得到每种影响类型的综合环境负荷[10]。根据各物质的潜能因子 PF 及其排放量即可确定每种污染类型的环境影响负荷(见表4),并以此构成环境影响负荷矩阵 A。

表4 再生水环境影响负荷统计表

影响类型	影响物质	重量(t/a)		PF	EB		总 EB	
		北石桥再生水(DE氧化沟)	平行对造工艺(活性污泥法)		北石桥	活性污泥法	北石桥再生水(DE氧化沟)	平行对造工艺(活性污泥法)
全球变暖	CO_2	30.47	38.362	1	30.47	38.362	47.19	59.42
	NO_X	0.119	0.150	40	4.760	5.993		
	CO	3.988	5.021	3	11.964	15.063		
大气酸化	NH_3	0.114	0.144	1.88	0.214	0.270	48.34	60.85
	NO_2	15.13	19.049	0.7	10.59	13.334		
	SO_2	37.53	47.250	1	37.53	47.25		
水体富营养化	N	410.63	517.089	1	410.63	517.089	416.13	524.02
	P	82.13	103.423	0.067	5.50	6.929		
水生物毒性	Hg	2.73	3.437	16.67	45.51	57.296	111.22	140.03
	Cd	5.48	6.899	2	10.96	13.799		
	Cu	54.75	68.930	1	54.75	68.930		

由此即可得到单一指数 $I = AW$,其中 A 为影响项目所构成的矩阵。计算得到西安市北石桥再生水(DE氧化沟工艺)环境影响指数 $I = [47.194, 48.34, 111.219, 416.13][0.466, 0.277, 0.161, 0.096]^T = 93.222$,同样的办法可计算平行对照工艺的再生水环境影响指数 $I' = 117.391$, $I' > I$,表明采用北石桥再生水(DE氧化沟工艺)生产工艺对环境的影响大于平行对照工艺(活性污泥法)。

5 再生水生命周期综合价值指数的求定

通过上面的分析,可以通过式(1)计算得出再生水生命周期综合价值指数,如西安市北石桥(氧化沟工艺)再生水综合价值指数为:

$$V = P/(IC) = 0.382/(93.222 \times 0.77) = 0.005\,3$$

同理,可以求出平行对照工艺条件下,西安市北石桥再生水综合价值指数 V' 为0.004 9,表明现有西安市北石桥(DE氧化沟工艺)再生水综合价值大于平行对照工艺(活性污泥法)条件下再生水综合价值。

6 结 语

在当今资源匮乏、能源出现危机的形式下,全社会都在关注可持续发展,城市污水处理领域也在向"源头控制,清洁生产"的全过程环境管理模式转换,生命周期评价是一种有效的量化分析方法,分析内容全面且直观,已经逐步受到到人们的重视。再生水生命周期综合价值模型解决了长期以来人们无法量化再生水价值的问题,对于全面客观地评价再生水项目具有十分重要的现实意义。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[参考文献]

[1] Revitzer G, Ekvall T. Life cycle assessment Part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications [J]. Environment International, 2004, 30: 701～720.

[2] Pennington DW, Potting J. Life cycle assessment Part 2: current impact assessment practice [J]. Environment International, 2004, 30: 721～739.

[3] 陈郁,郑洪波,杨凤林,等. 城市污水处理厂生命周期评价方法初探及应用案例[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(3): 292～297.

[4] Margareta Lundin, Magnus Bengtsson, Sverker Molander. Life cycle assessment of wastewater systems: influence of system boundaries and scale on calculated environmental loads[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(1): 180.

[5] Sven Lundie, Gregory M Peters, Paul C Beavis. Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(13): 3465.

[6] Marcus Carlsson Reich. Economic assessment of municipal waste management systems-case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(3): 253～263.

[7] Bernie Thomas, Forbes McDougall. International expert group on life cycle assessment for integrated waste management [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(3): 321～326.

[8] 吴敏,杨健. 普通生物滤池处理工艺的生命周期能耗分析[J]. 中国给水排水. 2001, 17(6): 69～72.

[9] 杨健,陆雍森,施鼎方,等. 运用生命周期分析(LCA)评估和选择废水处理工艺[J]. 工业用水与废水, 2000, 31(3): 4～6.

[10] 栾忠权. 产品生命周期环境特性的单一指标评估方法研究[J]. 机床与液压, 2004, (4): 15～17.

[11] 陈晓川,方明伦. DFC 中全生命周期成本数据的收集、处理与使用[J]. 机械设计与研究, 2001, 17(4): 12～15.

[12] 张旭梅,刘飞. 产品生命周期成本概念及分析方法[J]. 工业工程与管理, 2001, (3): 26～29.

[13] 束庆,张旭. 生命周期评价和生命周期成本分析的整合方法研究[J]. 同济大学学报(社会科学版), 2003, 14(4): 81～86.

[14] 曾建春,蔡建国. 面向产品生命周期的环境、成本和性能多指标评价[J]. 中国机械工程, 2000, 11(9): 975～978.

[15] 李学平. 用层次分析法求指标权重的标度方法的探讨[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2001, 3(1): 25～27.

[16] 赵焕臣,许树柏,和金生,等. 层次分析法[M]. 1 版. 北京:科学出版社, 1986.

(上接第 73 页)

面温度出现较大的温度差,从而影响热流计应用。

2) 不保温的砌块墙体,不能采用热流计测量墙体热阻。

3) 保温墙体,不能将热流传感器贴在不保温的一侧墙面上;应将热流传感器贴在保温一侧墙面上。测量墙体热阻时,应配合红外热像仪确定温度传感器位置[4]。

4) 在墙体平均热阻为 0.352 (m·℃)/W、内外表面温差大于 18 ℃的内保温墙体,室外温度大于 0 ℃、保温层厚度超过 70 mm 时,热流传感器可以贴在不设保温层的一侧。

致谢:感谢林海燕研究员提供的 STDA 软件,使得本研究得以开展。

[参考文献]

[1] 方修睦,姜永成,张建利. 建筑环境测试技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002: 60～63.

[2] 林海燕. 冷桥对墙体平均传热系数的影响[J]. 建筑科学, 1999, 15(3): 14～18.

[3] 林海燕. 墙体传热的三维模拟分析[C]//第八届建筑物理学术会议论文集. 北京:中国科学出版社, 2000: 48～53.

[4] 王杨洋,方修睦,李延平,等. 用红外热像仪测量建筑物表面温度的实验研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 84～88.

(上接第 94 页)

3) 采用该采暖设计热指标可大大减少管网设备的初投资,按此热指标运行调节可以节省能源 20 %～30 %,并可充分挖掘已有设备和管网的供热能力,达到在不增加热源和管网扩建的基础上扩大供热面积的效果。

[参考文献]

[1] 冯国会,龙昕红,赵嵩堪,等. 居住区节能建筑供热设计热指标分析[J]. 节能, 2003, 23(4): 36～39.

[2] 方修睦. 供暖居住建筑节能指标现场评价方法探讨[J]. 暖通空调, 2001, 31(6): 11～12.

[3] 贺平,孙刚. 供热工程[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社, 1993.

[4] 刘加平,董海荣,王怡,等. 关于采暖居住建筑耗热量指标的检验方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2001, 33(4): 361～364.

[5] 王健,郭骏. 经济合理地选取民用建筑热指标[J]. 区域供热, 1991, 10(1): 16～18.

[6] 孙玉宝,田贯三,王冬. 济南市集中供热蒸汽管网热损失的调查及分析[J]. 区域供热, 2006, 25(3): 29～33.

[7] 汤蕙芬,范季贤. 城市供热手册[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1992.

[8] 高鲁锋,田贯三. 蒸汽供热管网凝结水损失的影响因素及其分析[J]. 能源工程, 2008, 28(1): 50～54.

[9] 方修睦,王杨洋,李德英. 关于采暖居住建筑节能评价问题[J]. 建筑科学, 2006, 22(1): 53～56.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net